تأثیر زلزله‌های حوزهٔ دور و نزدیک بر تحریک غیریکنواخت سدهای بتنی وزنی★

تهمینه عباسی(۱)	بهرام نوائی‌نیا(۲)	لیلا کلانی‌ساروکلایی(۳)

چکیده *در این تحقیق پاسـخ دینامیکی سـدهای بتنی وزنی تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی و مکانی زلزله‌های حوزهٔ دور و نزدیک بررسی شده است. بدین منظور برای تحریک غیریکنواخت، عامل زمانی با تأخیر در زمان رسیدن مؤلفهٔ زلزله با سرعت موج برشی مشخص به تکیه‌گاه‌ها و عامل مکانی با تابع انسجام هریچندران-وانمارک و با احتساب مرکز سطحی زلزله در سه موقعیت مختلف مدل‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ‌ها متأثر از محتوای فرکانسی زلزله‌های یکنواخت و غیریکنواخت است. ضمن اینکه اثر غیریکنواختی زلزله بر پاسخ فشار هیدرودینامیک نسبت به پاسخ‌های تغییر مکان تاج سد و تنش در پاشنه کم‌تر است.*

واژه‌های کلیدی تحریک غیریکنواخت، اندرکنش سد و مخزن، روش لاگرانژی، سدهای بتنی وزنی، زلزله‌های حوزهٔ دور و نزدیک.

Effect of Far and Near Fault Earthquake on Non-uniform Excitation of Concrete Gravity Dams

T. Abbasi	B. Navayi Neya	L. Kalani Sarokolayi

Abstract *In this study, response of concrete gravity dams considering dam-reservoir interaction using Lagrangian approach under uniform and non-uniform excitation of near and far fault earthquake is investigated. For this purpose for wave passage effect, shear wave velocity of earthquake is used. For incoherence effect the Harichandran and Vanmarke coherency model and also earthquake epicenter in three positions is considered. The results show that dam responses depend on frequency content of uniform and non-uniform excitation. In addition, non-uniform excitation has less effect on hydrodynamic pressure in comparison with crest displacement and heal stress in dam.*

Key Words Non-uniform excitation, Dam-Reservoir interaction, Lagrangian approach, Concrete gravity dam, near and far fault earthquake.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۵/۲۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۱۰/۲۹ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

(۳) استادیار، دانشکده مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی طبری بابل.

Email: Navayi@nit.ac.ir

مقدمه

در تحلیل سازه‌ها تحت اثر زمین‌لرزه، اغلب از انتشار غیریکنواخت امواج در خاک صرف نظر شده و فرض می‌گردد امواج زلزله به‌طور هم‌زمان و بدون تغییر در محتوای فرکانسی به تمام قیدهای سازه می‌رسند. درحالی‌که در حالت کلی امواج لرزه‌ای ممکن است بسته به نسبت طول موج زلزله به ابعاد افقی سازه، به شکل غیریکنواخت به تکیه‌گاه‌های سازه برخورد نماید [۱]. عوامل مؤثر بر توزیع غیریکنواخت شتاب زمین که سبب تحریک غیریکنواخت سدهای بتنی وزنی می‌گردد را می‌توان به دو عامل زمان و مکان نسبت داد [2,3]. عامل زمان به دلیل پیمودن طول متفاوت مسیر توسط امواج لرزه‌ای به وجود می‌آید و به‌صورت تأخیر زمانی رسیدن امواج از یک نقطه به نقطه دیگر در سطح زمین نمایان می‌شود. امواج لرزه‌ای ناشی از این عامل بدون هیچ تغییری در شکل و محتوای فرکانسی، تنها با ایجاد اختلاف فاز در موقعیت‌های مکانی مختلف انتشار می‌یابند [۱]. عامل مکان نیز تحت تأثیر غیریکنواختی خاک بستر و کاهش پیوستگی امواج لرزه‌ای به وجود آمده و می‌تواند در دامنه امواج و یا محتوای فرکانسی و در نتیجه تاریخچه زمانی شتاب زمین تغییر ایجاد نماید. غیریکنواختی خاک بستر که متأثر از جنس خاک منطقه و توپوگرافی نقاط مقید تکیه‌گاهی است، برای سدهای بتنی که بر روی بستر سنگی همگن بنا می‌گردند از اهمیت کمتری برخوردار است [۱]. کاهش پیوستگی امواج که در مراجع مختلف تحت عناوین تابع انسجام یا همبستگی تعریف می‌گردد، به معنی تغییرات تصادفی شکل و فاز امواج بوده و به نحوه بازتاب و شکست امواج در لایه‌های مختلف زمین در مسیر حرکت از کانون زلزله تا نقاط مقید تکیه‌گاهی بستگی دارد [4,5]. توزیع غیریکنواخت شتاب زمین باعث تغییر در الگوی پاسخ سازه نسبت به حالت متداول تحلیل‌های یکنواخت می‌گردد. لذا انجام چنین تحلیل‌هایی برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر ضروری است. تحریک غیریکنواخت توسط بسیاری از محققان به‌عنوان یکی از مسائل مهم در تحلیل دینامیکی سدها مطرح شده است [6-10]. محققین با در نظرگیری فرضیات ساده‌شونده‌ای تأثیر این عامل را بر پاسخ خطی و غیرخطی سدها و نیز فشار هیدرودینامیکی آنها مورد بررسی قرار دادند. وجه تمایز این تحقیقات روش تعیین شتاب‌های تحریک غیریکنواخت در نقاط مختلف تکیه‌گاهی و نیز نحوه اعمال آنها بر سازه‌ها است. تحریک غیریکنواخت اولین بار توسط بوغدانوف در سال ۱۹۶۵ مطرح گردید. وی بیان نمود که در صورت معلوم بودن حرکت غیریکنواخت میدان آزاد زمین در نقاط مختلف تکیه‌گاه‌ها، پاسخ سازه می‌تواند با تحلیل در دامنه زمان یا فرکانس محاسبه گردد [11]. ونگ و چوپرا در سال ۲۰۱۰ پاسخ دینامیکی خطی چندین سد قوسی را تحت تحریک غیریکنواخت با در نظر گرفتن اندرکنش سد–پی–مخزن بررسی نمودند. ایشان با توجه به تحریکات ثبت شده در بدنه و پی سد، تاریخچه زمانی تحریک سایر نقاط را تولید و نتیجه گرفتند که تأثیر تحریک غیریکنواخت بر رفتار سد بسته به عواملی چون دوری و نزدیکی به گسل، مراکز عمقی و سطحی، عمق کانونی و محتوای فرکانسی زلزله می‌تواند قابل توجه باشد [12]. زلزله‌های نزدیک گسل یا اصطلاحاً زلزله‌های حوزهٔ نزدیک که در مرجع [12] و نیز برخی کارهای دیگر از آن استفاده گردیده به زلزله‌هایی اطلاق می‌شود که فاصلهٔ مرکز سطحی زلزله تا ایستگاه ثبت زلزله کمتر از یک حد معینی باشد. برخی از محققین این فاصله را تا ۱۵ کیلومتر و برخی دیگر حتی ۵۰ کیلومتر در نظر می‌گیرند. سرعت‌نگاشت و لرزه‌نگاشت حاصل از حوزهٔ نزدیک عموماً دارای پالس شدید بوده و این در حالی است که چنین ویژگی در رکوردهای حوزهٔ دور دیده نمی‌شود. ضمن اینکه شتاب‌نگاشت‌های حوزهٔ دور برخلاف نزدیک عموماً دارای فرکانس پایین می‌باشند. غبارا و قائمیان [13] و میرزا بزرگ و همکاران [14] با استفاده از روش اجزا محدود به بررسی پاسخ دینامیکی غیرخطی سدهای بتنی وزنی و سدهای قوسی تحت تحریک غیریکنواخت زمین تحت اثر زلزله

پرداختند. ایشان در تحلیل‌های خود برای مدل‌سازی تأخیر زمانی حرکت امواج در غیریکنواختی حرکت زمین از سرعت امواج برشی ۶۵۰ متر بر ثانیه و بینهایت استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که این اثر در سد بتنی وزنی پاین‌فلت منجر به افزایش تغییر مکان تاج سد تحت زلزلهٔ ۱۹۷۶ کوینا و در سد بتنی قوسی امیرکبیر منجر به کاهش تنش‌های طره‌ای و شعاعی سد تحت زلزلهٔ منجیل شده است. هوانگ در سال ۲۰۰۲ رفتار غیرخطی سد بتنی وزنی کوینا را به روش اجزا محدود بررسی نمود. وی در تحلیل‌های خود ضمن استفاده از اجزای با طول بینهایت در بالادست مخزن و مرزهای پی، رفتار غیرخطی هندسی و مادی سد، پی و آب مخزن را نیز لحاظ نمود. وی با در نظرگیری تأخیر زمانی حرکت امواج تحت اثر زلزله، نتیجه گرفت که غیریکنواختی حرکت زمین تأثیر بسزایی بر پاسخ غیرخطی سدهای بتنی وزنی داشته و می‌تواند الگوی ترک و نیز توزیع تنش در سد را تغییر دهد. ایشان همچنین نتیجه گرفتند که اثر غیریکنواختی تحریک به مشخصات هندسی سد و نیز مشخصات لرزه‌ای حرکت زمین وابسته است [4]. کلانی و نوائی‌نیا اثر هم‌زمان مؤلفه‌های انتقالی و گهواره‌ای زلزله و حرکات غیریکنواخت انتقالی ناشی از عامل تأخیر زمانی را بر روی سد بتنی وزنی پاین‌فلت بررسی نمودند و به‌صورت کلی و با در نظرگیری اثر توأم مؤلفه‌های انتقالی و گهواره-ای شتاب زمین، نشان دادند که حرکات غیریکنواخت زمین که از تأخیر زمانی حرکت امواج در کف سد نشأت گرفته است می‌تواند بر توزیع پاسخ‌ها تأثیرگذار باشد [۱۵]. هریچندران و وانمارک [16,17]، هائو و همکاران [18]، هیندی و نواک [19] و آبراهامسون [20] مدل‌های مختلفی را برای تولید مؤلفه‌های تحریک غیریکنواخت مکانی ناشی از کاهش پیوستگی امواج لرزه‌ای ارائه نمودند. تفاوت این مدل‌ها، در رویدادهای زلزله و ساختگاه‌ها، روند عددی استفاده از اطلاعات ثبت شده و توابع میان‌یابی مختلف است. سانتاکروز و همکاران در سال ۱۹۹۹ نشان دادند که دو مدل هریچندران و وانمارک و مدل هیندی و نواک نسبت به سایر مدل‌ها دقت بیشتری دارند [21].

در این تحقیق تأثیر هر دو عامل زمانی و مکانی در تحریک غیریکنواخت به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و پاسخ‌های حاصل از آنها با نتایج تحریک یکنواخت مقایسه شده است. کلیه بررسی‌ها برای سه شتاب‌نگاشت حوزهٔ دور و سه شتاب‌نگاشت حوزهٔ نزدیک با موقعیت‌های مختلف مرکز سطحی در پنجه و پاشنهٔ سد و نیز بالادست مخزن صورت گرفته است.

روش‌های محاسباتی مدل‌سازی تحریک غیریکنواخت

برای تحریک غیریکنواخت زمانی و مکانی شتاب دو نقطه m و n بر روی سطح زمین را می‌توان با در نظرگیری دو عامل زمان و مکان، با رابطهٔ (۱) به یکدیگر مرتبط نمود [5].

$$A_n(\omega) = \gamma_{nm} \cdot A_m(\omega) \qquad (۱)$$

$$\gamma_{nm} = \gamma^{w}_{nm} \cdot \gamma^{s}_{nm} \cdot \left|\gamma^{i}_{nm}\right| \qquad (۲)$$

در روابط فوق $A_n(\omega)$ و $A_m(\omega)$ شتاب نقاط n و m بر حسب فرکانس زاویه‌ای حرکت امواج ω و γ^{w}_{nm}، معرف عامل زمانی ناشی از سرعت انتشار موج در بستر سد و γ^{s}_{nm} و γ^{i}_{nm} نیز نشان‌دهنده عوامل مکانی است. γ^{s}_{nm} متأثر از جنس خاک منطقه و توپوگرافی در دو نقطه مورد بررسی و γ^{i}_{nm} نیز متأثر از بازتاب و شکست امواج در مسیر حرکت از کانون زلزله تا نقاط مذکور است [8].

شتاب تحریک غیریکنواخت زمانی

در حالت خاص با فرض بستر همگن و ایزوتوپ، سه عبارت رابطهٔ (۲) به شکل γ^{s}_{nm} و γ^{i}_{nm} برابر یک و جمله γ^{w}_{nm} برابر $e^{-i\omega(\tau_{n,m})}$ می‌باشند که $\tau_{n,m}$ تأخیر زمانی رسیدن موج از نقطه n به m بوده و از رابطهٔ (۳) محاسبه می‌گردد [۱]:

$$\tau_{n,m} = \frac{l_{n,m}}{c_{n,m}} \qquad (۳)$$

در رابطهٔ فوق $l_{n,m}$ فاصلهٔ دو نقطه مورد بررسی و $C_{n,m}$ سرعت موج برشی است. شتاب نقطه n را می‌توان بر حسب زمان به صورت رابطهٔ (٤) بازنویسی نمود ($t \geq \tau_{n,m}$) [١]:

$$A_n(t) = A_m(t - \tau_{n.m}) \quad (٤)$$

شتاب تحریک غیریکنواخت مکانی

غیریکنواختی بستر در سدهای بتنی وزنی که معمولاً بر روی بستر سنگی همگن بنا نهاده می‌شوند از اهمیت کمتری برخوردار است و لذا دو عبارت γ_{nm}^{w} و γ_{nm}^{s} در رابطهٔ (٢) برابر یک و جمله $|\gamma_{nm}^{i}|$ برابر $|\gamma(v,\omega)|$ می‌باشند [١].

به‌منظور تولید مؤلفه های تحریک غیریکنواخت تحت اثر عامل مکانی لازم است تا شتاب‌نگاشت زلزلهٔ مورد نظر با تبدیل فوریه، از حوزهٔ زمان به حوزهٔ فرکانس، مطابق رابطهٔ (٥)، تبدیل گردد [22]:

$$F(\omega) = \int_0^{T_0} \ddot{u}_g(t) e^{-i\omega t} dt \quad (٥)$$

که در رابطهٔ (٥)، T_0، $\ddot{u}_g(t)$، $F(\omega)$ و ω به ترتیب کل مدت زمان زلزله، شتاب زلزله، تابع فرکانس و فرکانس زاویه‌ای زلزلهٔ مورد نظر می‌باشند. اندازه تابع فرکانس که به‌عنوان دامنه فوریه شناخته می‌شود از رابطهٔ (٦) قابل محاسبه است [22]:

$$|F(\omega)| = \left[\left(\int_0^{T_0} \ddot{u}_g(t) \cos \omega t dt\right)^2 + \left(\int_0^{T_0} \ddot{u}_g(t) \sin \omega t dt\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (٦)$$

تابع انسجام. مدل‌های مختلفی برای تابع انسجام جهت تعیین کاهش پیوستگی امواج با افزایش فاصله بین تکیه‌گاه‌ها به‌عنوان یکی از دو عامل مکانی که در تحریک غیریکنواخت مؤثر است، بیان شده است.

سه تابع انسجام پرکاربرد هریچندران و وانمارک، آبراهامسون و نیز هیندی و نواک [16,20] است. تفاوت این مدل‌ها، در رویدادهای زلزله و ساختگاه‌ها، روند عددی استفاده از اطلاعات ثبت شده و توابع میان‌یابی مختلف است. در این تحقیق برای مدل‌سازی تابع انسجام، مدل هریچندران و وانمارک که مطرح‌ترین و متداول‌ترین مدل در این زمینه بوده و نسبت به سایر مدل‌ها دقت بیشتری دارد [21]، انتخاب گردیده است.

هریچندران و وانمارک در سال ١٩٨٦ با بررسی رکورد چهار زلزله ثبت شده توسط شبکه لرزه سنجی SMART 1 در منطقه تایوان، تابع زیر را برای مدل‌سازی انسجام ارائه نمودند [16]:

$$|\gamma(v,\omega)| = A \exp\left[-\frac{2v}{\alpha\theta(\omega)}(1 - A + \alpha A)\right] + (1 - A) \exp\left[-\frac{2v}{\theta(\omega)}(1 - A + \alpha A)\right] \quad (٧)$$

که در آن ω فرکانس زاویه‌ای، f فرکانس و $\theta(\omega)$ نیز فرکانس وابسته به نوسانات مقیاس مکانی است و به‌صورت رابطهٔ (٨) تعریف می‌گردد:

$$\theta(\omega) = K\left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^b\right]^{-\frac{1}{2}} \quad (٨)$$

A، α ، K ، ω_0 و b نیز پارامترهایی هستند که با توجه به مشخصات هر زلزله و ساختگاه آن برآورد می‌شوند. در تحقیق حاضر، از مقادیر پارامتری مدل عمومی هریچندران، مطابق زیر که در مرجع [16] پیشنهاد گردیده استفاده می‌شود:

$$A = 0.636 \quad a = 0.0186 \quad K = 31200(m)$$
$$\omega_0 = 9.49 \left(\frac{rad}{s}\right) \quad b = 2.95$$

برای تعریف تابع انسجام از فاصلهٔ ایستگاه‌ها تا مرکز سطحی زلزله(v) و سرعت زاویه‌ای(ω) یا فرکانس(f) زلزله استفاده گردیده است. مقادیر پارامتری توابع مختلف انسجام، با توجه به مشخصات زلزله و ساختگاه آن محاسبه می‌گردند.

رابطه‌سازی اجزای محدود

در این تحقیق از روش لاگرانژی-لاگرانژی برای تحلیل سیستم سد-مخزن سدهای بتنی وزنی به دلیل رابطه سازی واحد در سیستم سد و مخزن استفاده می‌گردد. در حالت کلی معادله تعادل دینامیکی حرکت، در روش لاگرانژی-لاگرانژی برای سیستم سد-مخزن که تحت شتاب زمین قرارگرفته برحسب تغییر مکان نقاط گرهی، به فرم رابطهٔ (۹) بیان می‌شود [23]:

$$[M]\ddot{U}^t(t) + [C]\dot{U}(t) + [K]U(t) = \{P_s\} \qquad (۹)$$

در رابطهٔ فوق [M]، [K] و [C] به ترتیب ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی، $\dot{U}(t)$و $U(t)$ به ترتیب بردارهای سرعت و تغییر مکان دینامیکی نقاط گرهی سیستم، P_s بردار بار گرهی ناشی از وزن و فشار هیدرو استاتیک و $\ddot{U}^t(t)$ بردار شتاب کل درجات آزادی سازه است که از حاصل جمع بردار شتاب شبه استاتیکی $\ddot{U}^s(t)$ و دینامیکی $\ddot{U}(t)$ مطابق رابطهٔ (۱۰) به دست می‌آید:

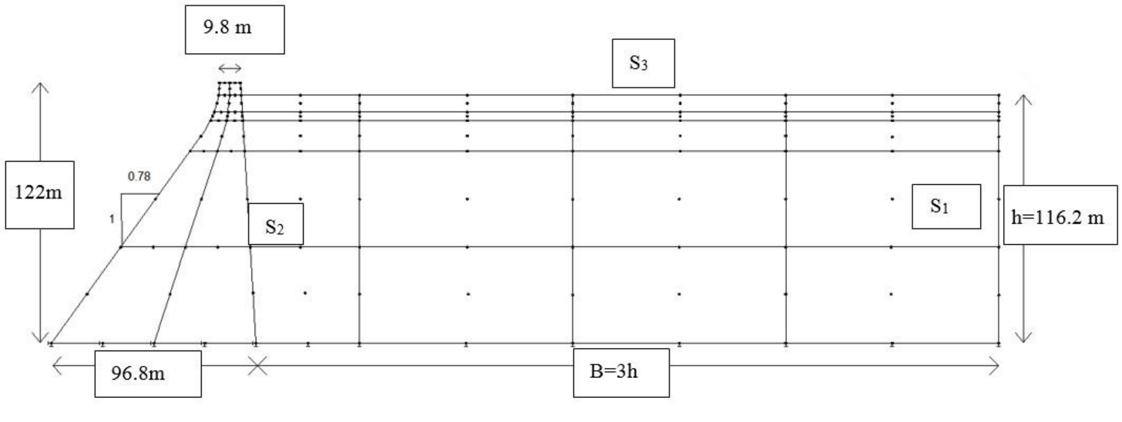
$$\ddot{U}^t(t) = \ddot{U}^s(t) + \ddot{U}(t) = l\ddot{U}_g(t) + \ddot{U}(t) \qquad (۱۰)$$

در رابطهٔ فوق l بردار تغییر مکان شبه استاتیکی بوده که ناشی از تغییر مکان صلب درجات آزادی سازه به ازای تغییر مکان واحد زمین و $\ddot{U}_g(t)$ نیز بردار شتاب حرکت زمین است. با جایگذاری رابطهٔ (۱۰) در رابطهٔ (۹) می‌توان نوشت:

$$[M]\ddot{U}(t)+[C]\dot{U}(t)+[K]U(t)=P_{eff}(t)+\{P_s\} \qquad (۱۱)$$

که در آن $P_{eff}(t) = -[M]l\ddot{U}_g(t)$ بردار بار گرهی مؤثر ناشی از تحریک یکنواخت و l نیز بردار تغییر مکان شبه استاتیکی است که در حالت تحریک یکنواخت شامل درایه‌های صفر و یک است.

در این تحقیق از المان‌های نه گرهی، با ٤ نقطه انتگرال‌گیری جهت انتگرال‌گیری کاهش‌یافته برای مدل-سازی محیط سیال در روش لاگرانژی و از المان‌های هشت گرهی با ۹ نقطه انتگرال‌گیری برای محیط جامد و حالت تنش مسطح استفاده می‌شود. به‌منظور اعمال شرط مرزی بین جامد و سیال از المان‌های میان رویّه‌ای شش گرهی با سه نقطه انتگرال‌گیری و ضخامت صفر استفاده می‌گردد [٢٦،٢٥]. ماتریس جرم مورد استفاده در این تحقیق به روش هینتون [27] به فرم یک ماتریس قطری در نظر گرفته می‌شود. مطابق با شکل (۱) برای سیستم سد-مخزن سدهای بتنی وزنی در حالت دوبعدی، سه شرط مرزی می‌توان در نظر گرفت که شامل انتشار امواج در بالادست مخزن (s_1)، شرط مرزی اندرکنش بین سد و مخزن (s_2) و امواج سطحی در سطح مخزن (s_3) می‌باشند [۲۵].



شکل ۱ مدل اجزا محدود، مرزها و مشخصات هندسی سد پاین‌فلت به همراه مخزن

ماتریس سختی کل سیستم از سرهم نمودن ماتریس سختی نظیر اجزای سد K_D، مخزن K_R و نیز اجزای میان رویّه‌ای K_{INT} مطابق رابطهٔ (۱۲) به دست می‌آید [۲۵]:

$$[K] = [K_D] + [K_R] + [K_{INT}] \qquad (۱۲)$$

ماتریس سختی اجزای سد از رابطهٔ (۱۳) محاسبه می‌گردد:

$$K_D = \int_{v_s} B^T D\, B\, dv \qquad (۱۳)$$

در رابطهٔ فوق B ماتریس دیفرانسیلی توابع شکل B^T ترانهاده ماتریس B و v_s دامنه المان سد و D نیز ماتریس الاستیسته در حالت تنش مسطح است. ماتریس سختی اجزای سیال را نیز می‌توان از رابطهٔ (۱٤) محاسبه نمود [۲۵]:

$$K_R = \int_{v_R} B^T C_R B dv + S_f \qquad (۱٤)$$

ماتریس الاستیسته C_R اجزای سیال، در روش لاگرانژی به‌صورت رابطهٔ (۱۵) تعریف می‌گردد که در آن K_w مدول بالک آب و S_f نیز سختی ناشی از امواج سطحی بوده که در ماتریس سختی اجزای سیال در نظر گرفته شده و از رابطهٔ (۱٦) محاسبه می‌شود [28]:

$$C_R = \begin{bmatrix} K_w & 0 \\ 0 & 100K_w \end{bmatrix} \qquad (۱۵)$$

$$S_f = \rho_w \cdot g \int_{s_3} N^T\, N\, ds \qquad (۱٦)$$

در روابط فوق N تابع شکل گره‌های سطح سیال، S_3 دامنه سطح سیال، V_R دامنه مخزن، ρ_w چگالی آب و g نیز شتاب ثقل می‌باشند. ماتریس سختی اجزای میان رویّه‌ای K_{INT} با اعمال شرایط مرزی بین محیط جامد و سیال که شامل آزادی لغزشی در جهت قائم و نیز عدم جدایی مخزن از سد (عدم آزادی لغزشی در جهت افقی) است، در نظر گرفته می‌شود [29]. ماتریس میرایی کل سیستم مطابق رابطهٔ (۱۷) از سرهم‌بندی میرایی ویسکوز داخلی اجزای سد و مخزن، C_{int}، میرایی ناشی از انتشار امواج در مرز بالادست مخزن، C_{rad} به دست می‌آید.

$$[C] = [C_{int}] + [C_{rad}] \qquad (۱۷)$$

میرایی ویسکوز داخلی در حالت خطی معمولاً به صورت ضریبی از ماتریس جرم و سختی الاستیک سیستم مطابق رابطهٔ (۱۸) تعریف می‌شود [۲۵]:

$$C_{int} = \alpha[M] + \beta[K] \qquad (۱۸)$$

ضرایب α و β با توجه به مرجع [۲۵] و میرایی ناشی از انتشار امواج در بالادست مخزن نیز از رابطهٔ (۱۹) قابل محاسبه است [18]:

$$C_{rad} = \rho_w . C_w \int_{s_1} N^T . N . ds \qquad (۱۹)$$

که در رابطهٔ فوق C_w سرعت انتشار موج در آب و برابر $\sqrt{\frac{K_w}{\rho_w}}$ است.

نحوهٔ انتخاب زلزلهٔ حوزهٔ دور و نزدیک

در این تحقیق از شتاب‌نگاشت‌های تفت (مؤلفهٔ افقی S69E)، طبس (مؤلفهٔ طولی) و السنترو (مؤلفهٔ N-S) مربوط به حوزهٔ دور و شتاب‌نگاشت‌های نورثریج (مؤلفهٔ طولی)، سن‌فرناندو (S74W) و بم (مؤلفهٔ طولی) مربوط به حوزهٔ نزدیک استفاده گردیده است. عوامل مؤثر در انتخاب شتاب‌نگاشت‌های یاد شده عبارت‌اند از:

۱. مقدار حداکثر سرعت حرکت زمین (PGV)
۲. فاصلهٔ ایستگاه‌های ثبت زلزله تا مرکز سطحی آن
۳. حرکات پالس‌گونه تاریخچهٔ زمانی تغییرمکان و سرعت

جدول (۱) مقایسه پارامتر PGV و فاصلهٔ ایستگاه‌های ثبت زلزله تا مرکز سطحی زلزله‌های حوزهٔ دور و نزدیک را نشان می‌دهد.

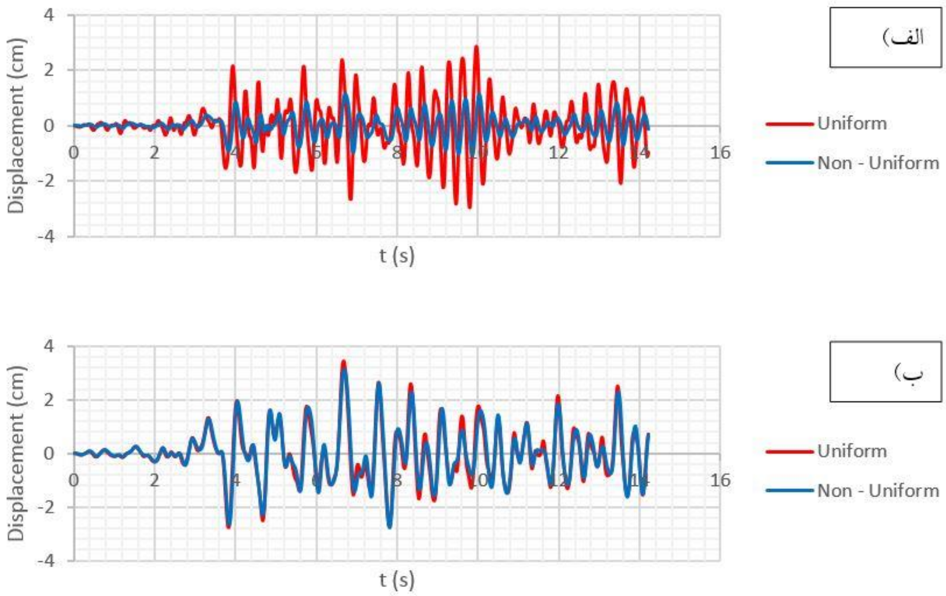
جدول ١ مقایسه پارامتر PGV و فاصلهٔ ایستگاه‌های ثبت زلزله تا مرکز سطحی زلزله‌های حوزهٔ دور و نزدیک

زلزله حوزه					
نزدیک			دور		
نام زلزله	PGV (cm/s)	فاصله (km)	نام زلزله	PGV (cm/s)	فاصله (km)
نورثریج	٦٣,٦٨١	١١,٧٩	تفت	١٧,١٢٢	٣٥,٠٠
سن‌فرناندو	٩٨,٦٨٣	١١,٨٦	طبس	١٣,٦٥٥	٧٤,٦٦
بم	٢٤,٦٧٢	٠,٠٥	ال_سنترو	٢,٤١٠	٢٨,٢٤

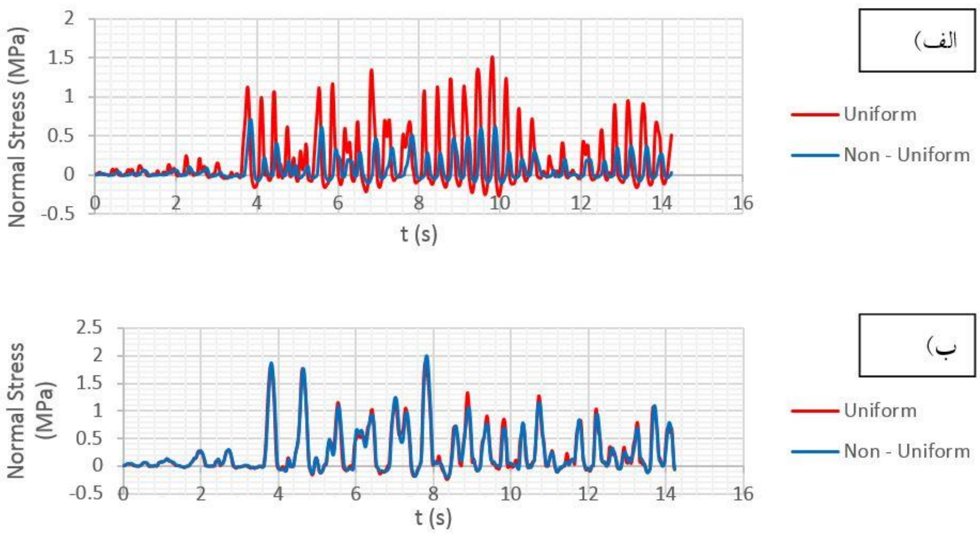
نتایج عددی

بر اساس مدل ارائه شده برای سیستم سد-مخزن، برنامهٔ کامپیوتری به زبان فرترن ٩٠ تهیه و محاسبات به کمک آن صورت پذیرفته است. به منظور صحت‌سنجی مدل مورد استفاده و نیز برنامهٔ کامپیوتری تهیه شده، نمونه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که شامل صحّت-سنجی تشکیل درست بردار l، تغییرمکان و تنش در سد، فشار در محیط مخزن به‌صورت مجزا و در حالت سد و مخزن و نیز عملکرد اجزای میان‌رویّه‌ای می‌باشند. نتایج حاصله صحت مدل مورد استفاده و برنامه کامپیوتری تهیه شده را نشان داده است [١٥,١ ,٢٥ ,٢٦ ,٣٠] و [13] که به دلیل محدودیت حجم مقاله از ارائه آن صرف‌نظر گردیده است. در این تحقیق پاسخ سد بتنی وزنی پاین‌فلت به ارتفاع ١٢٢ متر و طول ٩٦,٨ متر واقع در ایالت کالیفرنیای آمریکا با فرض ایزوتوپ و همگن بودن و رفتار الاستیک خطی مصالح سد و مخزن تحت بارگذاری یکنواخت و غیریکنواخت زلزله بررسی شده است. مشخصات مکانیکی مواد شامل چگالی kg/m^3 ١٠٠٠ و مدول بالک GPa ٢,٠٧ برای آب مخزن و نیز چگالی kg/m^3 ٢٥٠٠، مدول الاستیسیته ٢٢,٤GPa و ضریب پواسون ٠,٢ برای مصالح بتن سد لحاظ شده است [١]. در شکل (١) مشخصات هندسی و همچنین مدل اجزا محدود سد پاین‌فلت نشان داده شده که در آن شیب بالادست سد و پایین‌دست سد به ترتیب ١ به ٠,٠٥ و ١ به ٠,٧٨ و ارتفاع مخزن نیز h=116.2m است. تعداد اجزای انتخابی در محیط سد و مخزن بر اساس آنالیز حساسیت به ترتیب ١٢ و ٢٠ و نیز ٥ جز میان‌رویّه‌ای در نظر گرفته شده است.

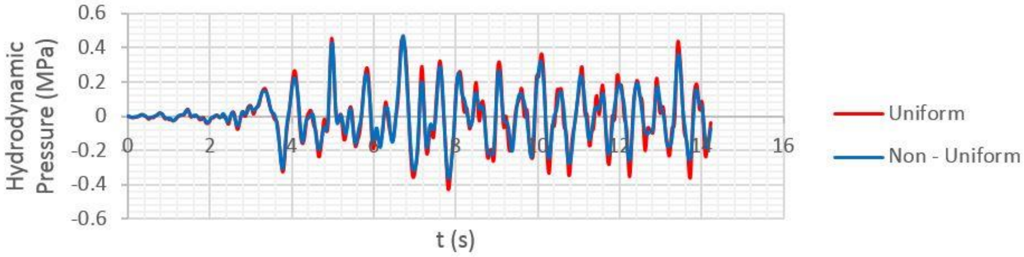
در شکل‌های (٢) و (٣) به ترتیب پاسخ تغییرمکان تاج سد و تنش نرمال پاشنهٔ سد پاین‌فلت در حالت مخزن خالی و مخزن پر و در شکل (٤) فشار هیدرودینامیک در پاشنهٔ سد در موقعیت مرکز سطحی زلزله در پنجه سد، تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ تفت مقایسه گردیده است. همان‌طور که شکل‌ها نشان می‌دهد، اختلاف پاسخ‌های ناشی از تحریک یکنواخت و غیریکنواخت در حالت مخزن خالی نسبت به حالت مخزن پر بیشتر بوده و در مجموع پاسخ‌های ناشی از تحریک یکنواخت بیشتر از تحریک غیریکنواخت است. به‌منظور بررسی اثر غیریکنواختی مکانی شتاب‌نگاشت، در شکل (٥) و (٦) به ترتیب پاسخ تغییرمکان تاج سد و تنش نرمال پاشنهٔ سد پاین‌فلت در حالت مخزن خالی و مخزن پر و در شکل (٧) فشار هیدرودینامیک در موقعیت مرکز سطحی زلزله در پنجه سد، تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی زلزلهٔ تفت مقایسه گردیده است. همان‌طور که شکل‌ها نشان می‌دهد، اختلاف پاسخ‌های ناشی از تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی نیز در حالت مخزن خالی نسبت به حالت مخزن پر بیشتر بوده و در مجموع پاسخ‌های ناشی از تحریک یکنواخت بیشتر از تحریک غیریکنواخت است.



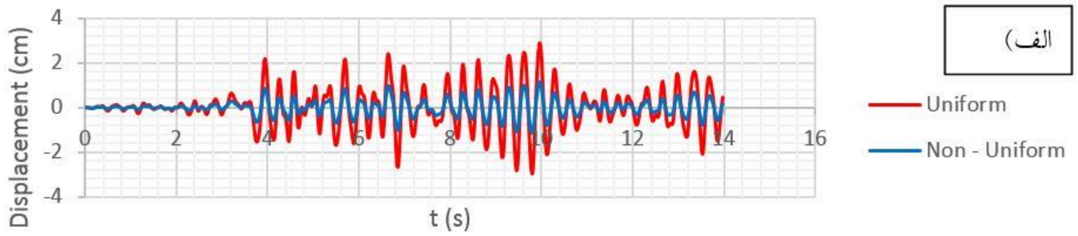
شکل ۲ تغییرمکان تاج سد تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ تفت الف) مخزن خالی ب) مخزن پر

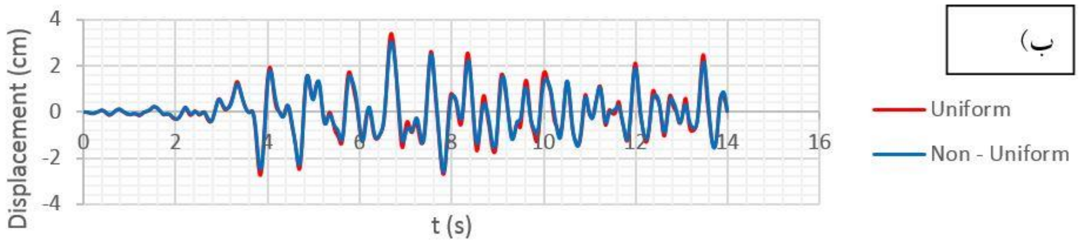


شکل ۳ تنش نرمال پاشنهٔ سد تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ تفت الف) مخزن خالی ب) مخزن پر

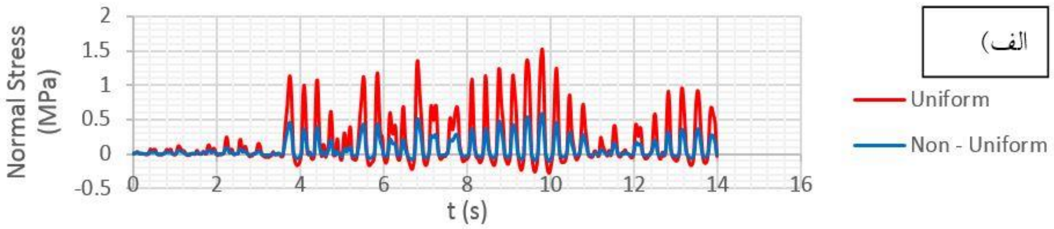


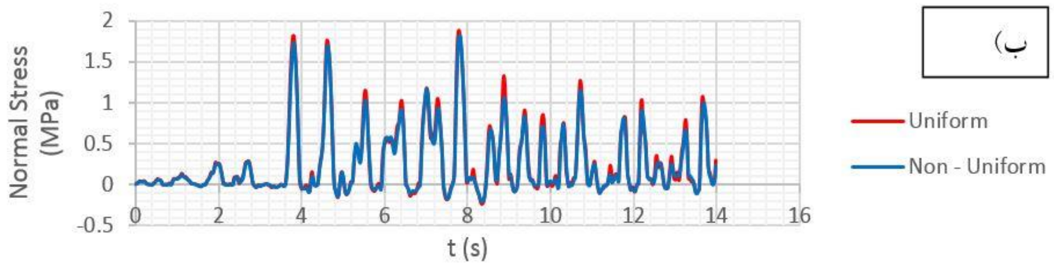
شکل ٤ فشار هیدرودینامیک پاشنهٔ سد تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ تفت



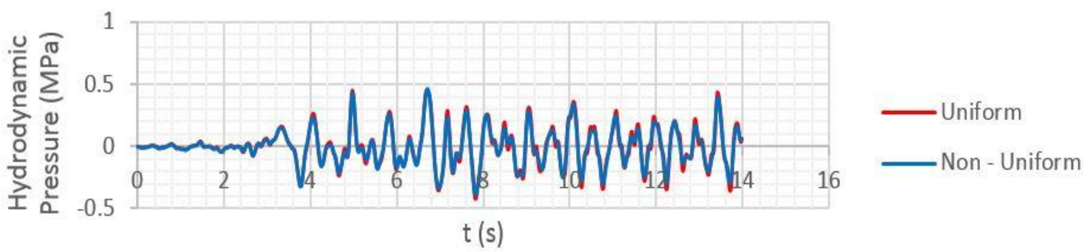


شکل ۵ تغییرمکان تاج سد تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی زلزلهٔ تفت الف) مخزن خالی ب) مخزن پر





شکل ۶ تنش نرمال پاشنهٔ سد تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی زلزلهٔ تفت الف) مخزن خالی ب) مخزن پر



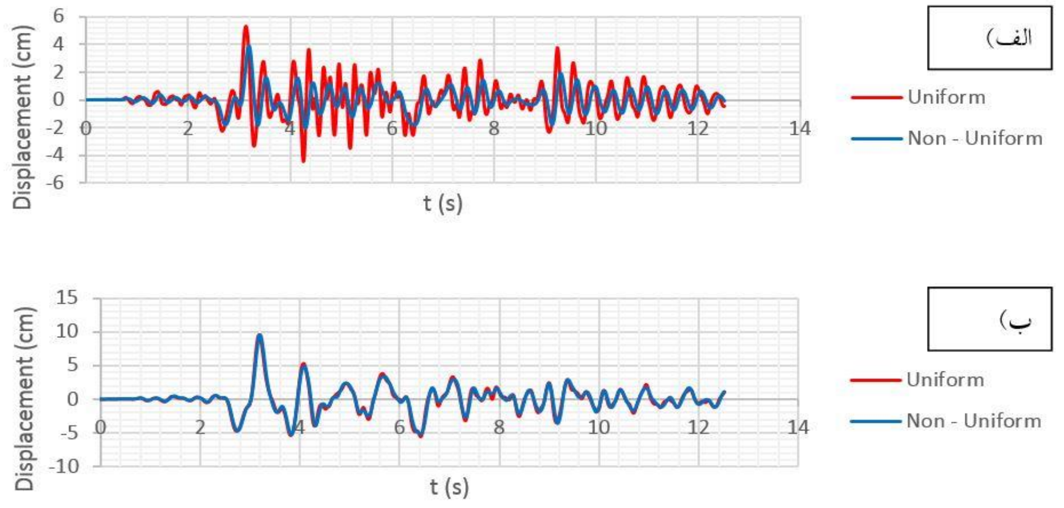
شکل ۷ فشار هیدرودینامیک پاشنهٔ سد تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی زلزلهٔ تفت

به‌منظور بررسی اثر زلزله‌های نزدیک بر پاسخ‌های سد به تحریک یکنواخت و غیریکنواخت در شکل (۸) و (۹) به ترتیب پاسخ تغییرمکان تاج سد و تنش نرمال پاشنهٔ سد پاین‌فلت در حالت مخزن خالی و مخزن پر و در شکل (۱۰) برای فشار هیدرو دینامیک در موقعیت مرکز سطحی زلزله در پنجه سد، تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ نورثریج و در شکل‌های (۱۱) الی (۱۳) تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی زلزلهٔ نورثریج مقایسه گردیده است.

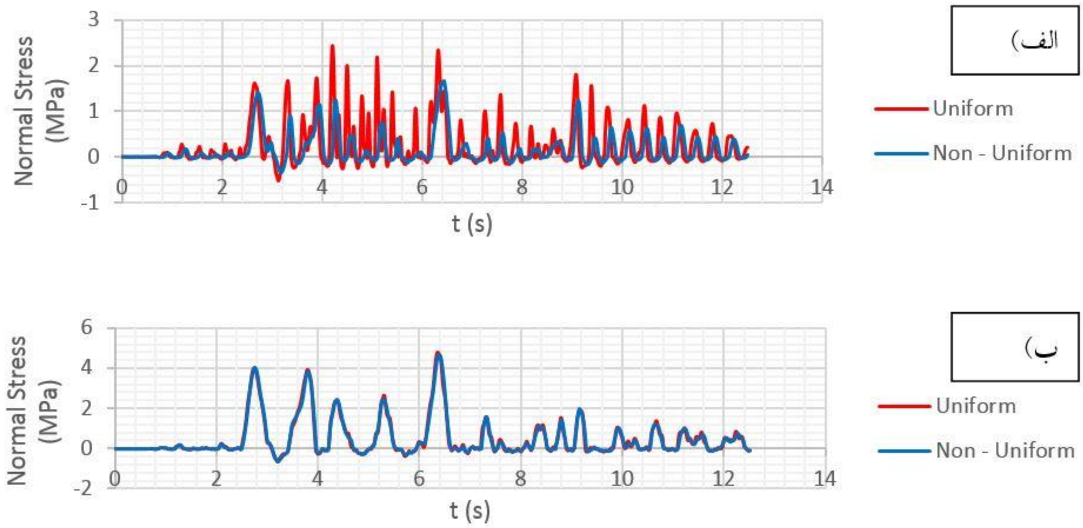
همان‌طور که شکل‌ها نشان می‌دهد، اختلاف پاسخ-های ناشی از تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زلزله‌های نزدیک نیز در حالت مخزن خالی نسبت به حالت مخزن پر بیشتر بوده و در مجموع پاسخ‌های ناشی از تحریک یکنواخت بیشتر از تحریک غیریکنواخت است. به‌طورکلی مقایسه شکل‌های (۲) الی (۷) با شکل-های (۸) الی (۱۳) نشان می‌دهد که تأثیر غیریکنواختی بر پاسخ‌های زلزلهٔ تفت، حوزهٔ دور، نسبت به پاسخ‌های زلزلهٔ نورثریج، حوزهٔ نزدیک، بیشتر است. در جدول‌های (۲) الی (۱۳) مقادیر حداکثر پاسخ‌ها تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت به ازای سه زلزلهٔ دور و سه زلزلهٔ نزدیک در سه موقعیت مرکز سطحی نشان داده شده است. جدول (۲) و (۳) نشان می‌دهد اثر تحریک غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ تفت نسبت به یکنواخت بر تغییرمکان تاج سد در موقعیت مرکز سطحی زلزله در پاشنهٔ سد در حالت مخزن خالی ۱۴۳,۳۸۳ درصد درحالی‌که در حالت مخزن پر ۱۵,٦٤۲ درصد است و تحت اثر تحریک غیریکنواخت مکانی نیز در حالت مخزن خالی ۱٤۲,٤۳۷ درصد درحالی‌که در حالت مخزن پر ۱۰,۳۱۲ درصد است.

جدول (٤) و (۵) نشان می‌دهد اثر تحریک غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ طبس بر فشار هیدرودینامیک پاشنهٔ سد در موقعیت مرکز سطحی زلزله در پنجه سد ۱۹۲,۳۷۳ درصد است و تحت اثر تحریک غیریکنواخت مکانی نیز ۵,۹۳۲ درصد است. جدول‌های (٦) و (۷) نشان می‌دهد اثر تحریک غیریکنواخت زمانی زلزله ال-سنترو بر تنش پاشنهٔ سد در موقعیت مرکز سطحی زلزله در پنجه سد در حالت مخزن خالی ۵۷,٤۳۹ درصد درحالی‌که در حالت مخزن پر ۱,٦۱۳ درصد است و تحت اثر تحریک غیریکنواخت مکانی نیز در حالت مخزن خالی ٤۷,٤۰۵ درصد درحالی‌که در حالت مخزن پر ۳,۲۲٦ درصد است. جدول‌های (۸) و (۹) نشان می-دهد اثر تحریک غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ نورثریج بر تغییرمکان تاج سد در موقعیت مرکز سطحی زلزله در پنجه سد در حالت مخزن خالی ۲٦,۵۳٦ درصد درحالی‌که در حالت مخزن پر ۰,۵٤۵- درصد است و تحت اثر تحریک غیریکنواخت مکانی نیز در حالت مخزن خالی ٤۵,٤۳۱ درصد درحالی‌که در حالت مخزن پر ٦,۵۹۸ درصد است. جدول‌های (۱۰) و (۱۱) نشان می‌دهد اثر تحریک غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ سن‌فرناندو بر فشار هیدرودینامیک پاشنهٔ سد در موقعیت مرکز سطحی زلزله در بالادست مخزن ۲٤,۰۸۹ درصد است و تحت اثر تحریک غیریکنواخت مکانی نیز ٦,۲۸٤ درصد است.

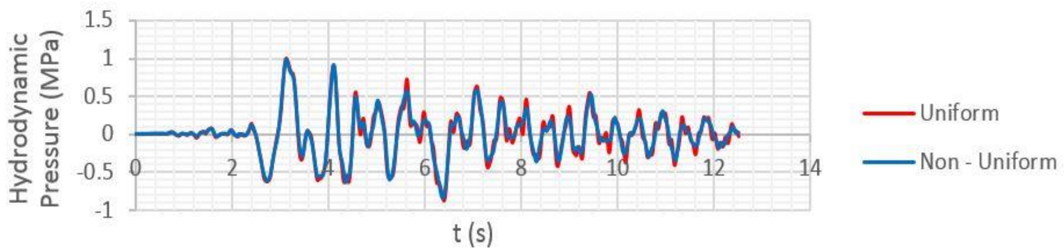
جدول‌های (۱۲) و (۱۳) نشان می‌دهد اثر تحریک غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ بم بر تنش پاشنهٔ سد در موقعیت مرکز سطحی زلزله در بالادست مخزن در حالت مخزن خالی ٦۵,۵۷۱ درصد درحالی‌که در حالت مخزن پر ۲۰,۲۷۲ درصد است و تحت اثر تحریک غیریکنواخت مکانی نیز در حالت مخزن خالی ۷۹,۰۸۰ درصد درحالی‌که در حالت مخزن پر ۱۸,۰۹۵ درصد است.



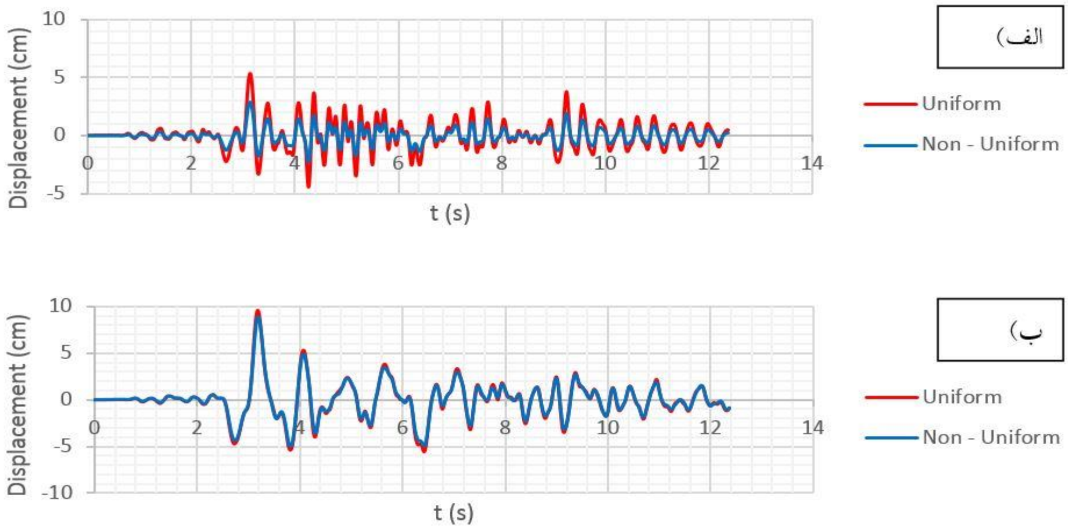
شکل ۸ تغییرمکان تاج سد تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ نورثریج الف) مخزن خالی ب) مخزن پر



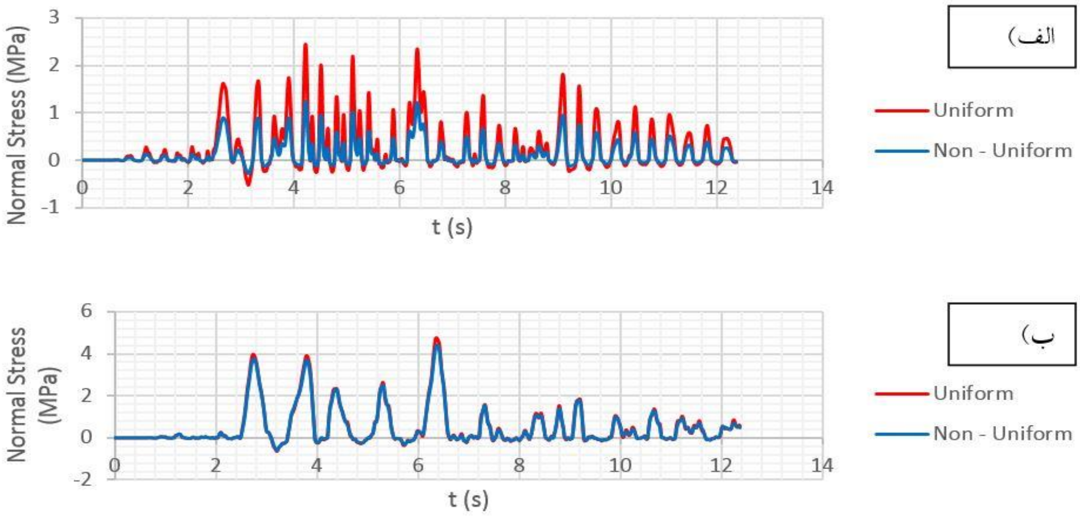
شکل ۹ مقایسه تنش نرمال پاشنهٔ سد تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی نورثریج الف) مخزن خالی ب) مخزن پر



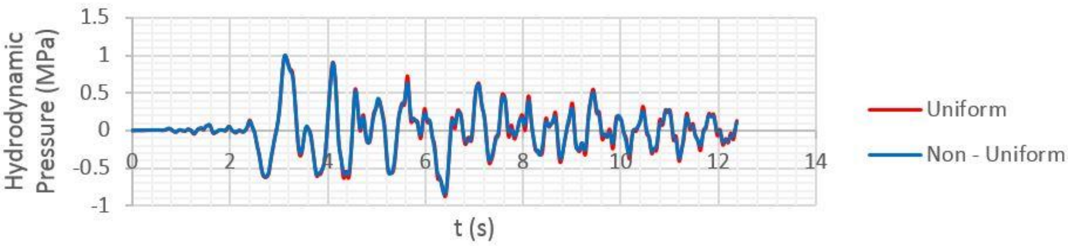
شکل ۱۰ فشار هیدرودینامیک پاشنهٔ سد تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ نورثریج



شکل ۱۱ مقایسه تغییرمکان تاج سد تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی نورثریج الف) مخزن خالی ب) مخزن پر



شکل ۱۲ مقایسه تنش نرمال پاشنهٔ سد تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی نورثریج الف) مخزن خالی ب) مخزن پر



شکل ۱۳ فشار هیدرودینامیک پاشنهٔ سد تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی زلزلهٔ نورثریج

جدول ۲ مقادیر حداکثر پاسخ‌ها تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ تفت

پاسخ	مرکز سطحی	مخزن خالی					مخزن پر				
		یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)	یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)
		مقدار	زمان	مقدار	زمان		مقدار	زمان	مقدار	زمان	
تغییرمکان تاج (cm)	پنجه	-2.962	9.80	1.139	6.72	138.454	3.433	6.68	3.133	6.70	8.739
	پاشنه			1.285	10.14	143.383			2.896	6.70	15.642
	بالادست مخزن			1.285	11.04	143.383			2.891	6.70	15.788
تنش پاشنه (MPa)	پنجه	1.517	9.80	0.718	3.84	52.670	1.880	7.80	1.993	7.82	-6.011
	پاشنه			0.641	7.00	57.745			1.978	7.82	-5.213
	بالادست مخزن			0.641	7.90	57.745			1.775	7.84	5.585
فشار هیدرودینامیک A (MPa)	پنجه	-	-	-	-	-	0.454	6.70	0.470	6.72	-3.524
	پاشنه			-	-	-			0.478	6.72	-5.286
	بالادست مخزن			-	-	-			0.450	6.72	0.880

جدول ۳ مقادیر حداکثر پاسخ‌ها تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی زلزلهٔ تفت

پاسخ	مرکز سطحی	مخزن خالی					مخزن پر				
		یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)	یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)
		مقدار	زمان	مقدار	زمان		مقدار	زمان	مقدار	زمان	
تغییرمکان تاج (cm)	پنجه	-2.962	9.80	1.158	9.96	139.095	3.433	6.68	3.058	6.68	10.923
	پاشنه			1.257	9.96	142.437			3.079	6.68	10.312
	بالادست مخزن			0.447	9.96	115.091			2.880	6.68	16.108
تنش پاشنه (MPa)	پنجه	1.517	9.80	0.718	9.80	52.670	1.880	7.80	1.832	7.82	2.553
	پاشنه			0.641	9.80	57.745			1.828	7.82	2.766
	بالادست مخزن			0.641	9.80	57.745			1.821	7.82	3.138
فشار هیدرودینامیک A (MPa)	پنجه	-	-	-	-	-	453.92	6.70	0.467	6.72	-2.863
	پاشنه			-	-	-			0.465	6.72	-2.423
	بالادست مخزن			-	-	-			0.470	6.72	-3.524

جدول ٤ مقادیر حداکثر پاسخ‌ها تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ طبس

پاسخ	مرکز سطحی	مخزن خالی					مخزن پر				
		یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)	یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)
		مقدار	زمان	مقدار	زمان		مقدار	زمان	مقدار	زمان	
تغییرمکان تاج (cm)	پنجه	-1.088	24.26	-0.509	24.30	53.217	2.222	24.96	2.190	24.96	1.440
	پاشنه			0.513	24.94	147.151			2.115	24.96	4.815
	بالادست مخزن			0.513	25.96	147.151			2.020	24.96	9.091
تنش پاشنه (MPa)	پنجه	0.827	21.48	0.384	21.52	53.567	1.284	22.36	1.269	22.38	1.168
	پاشنه			0.371	22.38	55.139			1.282	22.38	0.156
	بالادست مخزن			0.371	23.40	55.139			1.208	22.38	5.919
فشار هیدرودینامیک A(MPa)	پنجه	-	-	-	-	-	-0.354	26.12	0.327	25.86	192.373
	پاشنه			-	-	-			0.314	25.88	188.701
	بالادست مخزن			-	-	-			-0.316	26.12	10.734

جدول ٥ مقادیر حداکثر پاسخ‌ها تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی زلزلهٔ طبس

پاسخ	مرکز سطحی	مخزن خالی					مخزن پر				
		یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)	یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)
		مقدار	زمان	مقدار	زمان		مقدار	زمان	مقدار	زمان	
تغییرمکان تاج (cm)	پنجه	-1.088	24.26	-0.419	24.26	61.489	2.222	24.96	2.096	24.96	5.671
	پاشنه			-0.468	24.26	56.985			2.106	24.96	5.220
	بالادست مخزن			-0.161	24.26	85.202			2.039	24.96	8.236
تنش پاشنه (MPa)	پنجه	0.827	21.48	0.318	21.48	61.548	1.284	22.36	1.240	22.38	3.427
	پاشنه			0.361	21.48	56.348			1.245	22.38	3.037
	بالادست مخزن			0.123	21.48	85.127			1.218	22.38	5.140
فشار هیدرودینامیک (MPa) A	پنجه	-	-	-	-	-	-0.354	26.12	-0.333	26.12	5.932
	پاشنه			-	-	-			-0.335	26.12	5.367
	بالادست مخزن			-	-	-			-0.325	26.12	8.192

جدول ٦ مقادیر حداکثر پاسخ‌ها تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ السنترو

پاسخ	مرکز سطحی	مخزن خالی					مخزن پر				
		یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)	یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)
		مقدار	زمان	مقدار	زمان		مقدار	زمان	مقدار	زمان	
تغییرمکان تاج (cm)	پنجه	0.604	1.405	0.286	1.505	52.649	0.638	12.605	0.623	1.930	2.351
	پاشنه			-0.264	1.560	143.709			0.559	12.605	12.382
	بالادست مخزن			-0.263	3.195	143.543			0.561	1.930	12.069
تنش پاشنه (MPa)	پنجه	0.289	1.250	0.123	1.665	57.439	0.434	16.86	0.427	16.870	1.613
	پاشنه			0.146	1.530	49.481			0.404	16.865	6.912
	بالادست مخزن			0.146	3.165	49.481			0.409	12.925	5.760
فشار هیدرودینامیک A (MPa)	پنجه	-	-	-	-	-	-0.121	12.915	-0.114	12.915	5.785
	پاشنه			-	-	-			-0.113	12.915	6.612
	بالادست مخزن			-	-	-			-0.109	12.905	9.917

جدول (۷): مقادیر حداکثر پاسخ‌ها تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی زلزلهٔ السنترو

پاسخ	مرکز سطحی	مخزن خالی					مخزن پر				
		یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)	یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)
		مقدار	زمان	مقدار	زمان		مقدار	زمان	مقدار	زمان	
تغییرمکان تاج (cm)	پنجه	0.604	1.405	0.313	1.405	48.179	0.638	12.605	0.595	12.610	6.740
	پاشنه			0.341	1.405	43.543			0.599	12.610	6.113
	بالادست مخزن			0.145	1.405	75.993			0.572	12.610	10.345
تنش پاشنه (MPa)	پنجه	0.289	1.250	0.152	1.245	47.405	0.434	16.86	0.420	16.86	3.226
	پاشنه			0.165	1.245	42.907			0.422	16.86	2.765
	بالادست مخزن			0.073	1.240	74.740			0.413	16.86	4.839
فشار هیدرودینامیک A (MPa)	پنجه	-	-	-	-	-	-0.121	12.915	-0.116	12.915	4.132
	پاشنه			-	-	-			-0.116	12.915	4.132
	بالادست مخزن			-	-	-			-0.113	12.915	6.612

جدول ۸ مقادیر حداکثر پاسخ‌ها تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ نورثریج

پاسخ	مرکز سطحی	مخزن خالی					مخزن پر				
		یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف	یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف
		مقدار	زمان	مقدار	زمان	(%)	مقدار	زمان	مقدار	زمان	(%)
تغییرمکان تاج (cm)	پنجه	5.340	3.125	3.923	3.185	26.536	9.533	3.185	9.585	3.205	-0.545
	پاشنه			3.998	3.210	25.131			9.599	3.210	-0.692
	بالادست مخزن			3.997	3.765	25.150			7.965	3.200	16.448
تنش پاشنه (MPa)	پنجه	2.449	4.215	1.675	6.440	31.605	4.780	6.360	4.668	6.380	2.343
	پاشنه			1.651	6.410	32.585			4.679	6.400	2.113
	بالادست مخزن			1.651	6.965	32.585			3.721	6.405	22.155
فشار هیدرودینامیک A (MPa)	پنجه	-	-	-	-	-	0.996	3.135	0.975	3.135	2.108
	پاشنه			-	-	-			0.985	3.130	1.104
	بالادست مخزن			-	-	-			1.001	3.135	-0.502

جدول ۹ مقادیر حداکثر پاسخ‌ها تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی زلزلهٔ نورثریج

پاسخ	مرکز سطحی	مخزن خالی					مخزن پر				
		یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف	یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف
		مقدار	زمان	مقدار	زمان	(%)	مقدار	زمان	مقدار	زمان	(%)
تغییرمکان تاج (cm)	پنجه	5.340	3.125	2.914	3.125	45.431	9.533	3.185	8.904	3.195	6.598
	پاشنه			3.123	3.125	41.517			8.961	3.190	6.000
	بالادست مخزن			1.500	3.125	71.910			8.602	3.200	9.766
تنش پاشنه (MPa)	پنجه	2.449	4.215	1.239	4.215	49.408	4.780	6.360	4.416	6.375	7.615
	پاشنه			1.351	6.325	44.835			4.455	6.370	6.799
	بالادست مخزن			0.702	6.330	71.335			4.245	6.375	11.192
فشار هیدرودینامیک A (MPa)	پنجه	-	-	-	-	-	0.996	3.135	0.997	3.135	-0.100
	پاشنه			-	-	-			0.998	3.135	-0.201
	بالادست مخزن			-	-	-			1.000	3.135	-0.402

جدول ۱۰ مقادیر حداکثر پاسخ‌ها تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ سن‌فرناندو

پاسخ	مرکز سطحی	مخزن خالی					مخزن پر				
		یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف	یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف
		مقدار	زمان	مقدار	زمان	(%)	مقدار	زمان	مقدار	زمان	(%)
تغییرمکان تاج (cm)	پنجه	-11.048	8.21	-10.815	8.23	2.109	-18.713	8.34	-19.116	8.34	-2.154
	پاشنه			-10.466	8.23	5.268			-19.368	8.34	-3.500
	بالادست مخزن			-10.466	8.40	5.268			-15.410	8.36	17.650
تنش پاشنه (MPa)	پنجه	6.237	7.83	6.157	7.85	1.283	11.258	8.33	10.950	8.33	2.736
	پاشنه			5.835	7.85	6.445			10.996	8.33	2.327
	بالادست مخزن			5.835	8.02	6.445			8.491	8.33	24.578
فشار هیدرودینامیک A (MPa)	پنجه	-	-	-	-	-	2.387	8.58	2.400	8.59	-0.545
	پاشنه			-	-	-			2.418	8.59	-1.299
	بالادست مخزن			-	-	-			1.812	8.59	24.089

جدول ۱۱ مقادیر حداکثر پاسخ‌ها تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی زلزلهٔ سن‌فرناندو

پاسخ	مرکز سطحی	مخزن خالی					مخزن پر				
		یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف	یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف
		مقدار	زمان	مقدار	زمان	(%)	مقدار	زمان	مقدار	زمان	(%)
تغییرمکان تاج (cm)	پنجه	-11.048	8.21	-5.146	8.21	53.421	-18.713	8.34	-17.555	8.34	6.188
	پاشنه			-5.616	8.21	49.167			-17.663	8.34	5.611
	بالادست مخزن			-2.030	8.21	81.626			-16.917	8.34	9.598
تنش پاشنه (MPa)	پنجه	6.237	7.83	2.903	7.83	53.455	11.258	8.33	10.105	8.33	10.242
	پاشنه			3.182	7.83	48.982			10.202	8.33	9.380
	بالادست مخزن			1.158	7.83	81.433			9.540	8.33	15.260
فشار هیدرودینامیک A (MPa)	پنجه	-	-	-	-	-	2.387	8.58	2.288	8.58	4.148
	پاشنه			-	-	-			2.298	8.58	3.728
	بالادست مخزن			-	-	-			2.237	8.59	6.284

جدول ۱۲ مقادیر حداکثر پاسخ‌ها تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت زمانی زلزلهٔ بم

پاسخ	مرکز سطحی	مخزن خالی					مخزن پر				
		یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)	یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)
		مقدار	زمان	مقدار	زمان		مقدار	زمان	مقدار	زمان	
تغییرمکان تاج (cm)	پنجه	6.419	4.240	2.800	3.980	56.379	-4.781	3.800	4.434	3.655	192.742
	پاشنه			-2.886	4.190	144.960			-4.229	3.830	11.546
	بالادست مخزن			-2.886	4.905	144.960			-3.821	3.820	20.079
تنش پاشنه (MPa)	پنجه	4.197	4.390	1.732	3.805	58.732	2.205	3.800	2.109	3.850	4.354
	پاشنه			1.445	4.835	65.571			1.963	3.850	10.975
	بالادست مخزن			1.445	5.550	65.571			1.758	3.850	20.272
فشار هیدرودینامیک A (MPa)	پنجه	-	-	-	-	-	556.87	3.595	0.555	3.590	0.359
	پاشنه			-	-	-			0.566	3.590	-1.616
	بالادست مخزن			-	-	-			0.582	3.590	-4.488

جدول ۱۳ مقادیر حداکثر پاسخ‌ها تحت تحریک یکنواخت و غیریکنواخت مکانی زلزلهٔ بم

پاسخ	مرکز سطحی	مخزن خالی					مخزن پر				
		یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)	یکنواخت		غیریکنواخت		اختلاف (%)
		مقدار	زمان	مقدار	زمان		مقدار	زمان	مقدار	زمان	
تغییرمکان تاج (cm)	پنجه	6.419	4.240	3.247	4.235	49.416	-4.781	3.800	-4.285	3.805	10.374
	پاشنه			3.555	4.240	44.617			-4.330	3.805	9.433
	بالادست مخزن			1.464	4.235	77.193			-4.028	3.810	15.750
تنش پاشنه (MPa)	پنجه	4.197	4.390	1.981	4.390	52.800	2.205	3.800	1.937	3.815	12.154
	پاشنه			2.240	4.390	46.628			1.960	3.815	11.111
	بالادست مخزن			0.878	4.390	79.080			1.806	3.815	18.095
فشار هیدرودینامیک A (MPa)	پنجه	-	-	-	-	-	0.557	3.595	0.568	3.590	-1.975
	پاشنه			-	-	-			0.568	3.590	-1.975
	بالادست مخزن			-	-	-			0.578	3.590	-3.770

نتیجه‌گیری

در این تحقیق که از سه شتاب‌نگاشت مربوط به ایستگاه‌های حوزهٔ دور زلزله‌های تفت، طبس و ال‌سنترو و همچنین از سه شتاب‌نگاشت مربوط به ایستگاه‌های حوزهٔ نزدیک زلزله‌های نورثریج، سن‌فرناندو و بم برای بررسی تحریک غیریکنواخت مکانی و زمانی در تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی خطی روی سد بتنی وزنی پاین‌فلت استفاده شده، نتایج زیر حاصل گردیده است:

۱. پاسخ سازه به‌شدت به محتوای فرکانسی و سرعت موج برشی زلزله‌های حوزهٔ دور و نزدیک وابسته است.

۲. تحریک غیریکنواخت زمانی و مکانی در حالت مخزن خالی سبب کاهش چشم‌گیری در پاسخ‌ها نسبت به تحریک یکنواخت شده است.

۳. برخلاف سدها در حالت مخزن خالی، اختلاف پاسخ‌ها در حالت مخزن پر تحت تحریک غیریکنواخت زمانی و مکانی نسبت به یکنواخت کم‌تر بوده ولی پاسخ‌ها تحت اثر زلزلهٔ غیریکنواخت عمدتاً بیشتر از زلزلهٔ یکنواخت است.

٤. موقعیت مرکز سطحی زلزله در تحریک غیریکنواخت زمانی و مکانی علاوه بر اینکه مقادیر حداکثر پاسخ‌ها را تغییر می‌دهد تاریخچه زمانی پاسخ‌ها را نیز دستخوش تغییرات قابل توجهی می‌نماید.

۵. اثر تحریک غیریکنواخت بر روی پاسخ فشار هیدرودینامیک نسبت به تغییرمکان تاج سد و نیز تنش در پاشنهٔ سد کم‌تر است.

٦. تأثیر غیریکنواختی زمانی و مکانی بر مقادیر حداکثر پاسخ‌های تغییرمکان تاج سد و تنش در پاشنهٔ سد برای حالت مخزن خالی تحت زلزلهٔ حوزهٔ دور نسبت به حوزهٔ نزدیک بیشتر است. این پدیده برای حالت مخزن پر دارای روند خاصی نبوده درحالی‌که برای مقادیر حداکثر فشار هیدرودینامیک تحت زلزلهٔ حوزهٔ نزدیک از دور بیشتر است.

مراجع

۱. کلانی ســاروکلایی، لیلا، «تحلیل دینامیکی غیرخطی ســدهای بتنی وزنی تحت حرکات ناهمگون انتقالی و دورانی زلزله»، رســاله دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه مازندران، (۱۳۹۲).

2. Alves, S. W., “Nonlinear analysis of Pacoima dam with spatially nonuniform ground motion”, Ph. D thesis, California Institute of Technology, (2005).

3. Harichandran, R. S., “Spatial variation of earthquake ground motion, what is it, how do we model it, and what are its engineering Implications”, Department of Civil and Enviromental Engineering, Michigan State Univ, East Lansing, Mich, (1999).

4. Huang, J., “Earthquake performance assessment of concrete gravity dams subjected to spatially varying seismic ground motions”, Structure and Infrastructure Engineering, pp. 1-16, (2002).

5. Zerva, A. and Zervas, V., “Spatial variation of seismic ground motions: An overview”, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 55, No.3, pp. 271-297, (2002).

6. Bayractar, A. Dmanogl, A. and Calayir, Y., “Asynchronousdy dynamic analysis of dam-reservoir-foundation systems by the Lagrangian approach”, *Coumputers and Structures*, Vol. 58, No.5, Pp. 925 -935, (1996).

7. Bayractar, A. and Dumanoglu, A., “The effect of the asynchronous ground motion on hydrodynamic pressures”, *Computers and Structures*, Vol. 68, No.1, Pp. 271-282, (1998).

8. Bilici, Y., et al., “Stochastic dynamic response of dam-reservoir-foundation systems to spatially Varying earthquake ground motions”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 29, No.3, pp. 444-458, (2009).

9. Chopra, A. K. and Wang, J. T., “Eearthquake response of arch dams to spatially varying ground motion”, Eearthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 39, No.8, pp. 887-906, (2010).

10. Chen, M. T.and Harichandran, R. S., “Response of an earth dam to spatially varying earthquake ground motion”, Engineering Mechanics, Vol. 127, No.9, pp. 932-939, (2001).

11. Bogdanoff, J. L., Goldberg, J. E. and Schiff, A. J., “The Effect of Ground Transmission Time on the Response of Long Structures”, pp. 627-640, (1965).

12. Wang, J. T. and Chopra, A. K., “Linear analysis of concrete arch dams including dam-water-foundation rock interaction considering spatially varying ground motion”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 39, No.7, Pp. 731-750, (2010).

13. Ghobarah, A. and Ghaemian, M., “Travelling wave effect on hydrodynamic forces on dams”, *Journal of European Engineering*, Vol. XIII, No.3, Pp. 22-34, (1999).

14. Mirzabozorg, H. and Varmazyari, M., “Dam-reservoir-massed foundation system and travelling wave along reservoir bottom”, *Soil Dynamic and Earthquake Engineeing*, Vol. 30, No.8, Pp. 746-756, (2010).

۱۵. کلانی ساروکلایی، لیلا، نوائی‌نیا، بهرام، «تحلیل دینامیکی سدهای بتنی وزنی در اثر حرکات غیریکنواخت انتقالی و دورانی زلزله با درنظر گرفتن اندرکنش سد و مخزن»، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر، مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ٤٨، شماره ۱، صص ۱۰۳–۹۱، (۱۳۹۵).

16. Harichandran, R. S. and Vanmarcke, E. H., “Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time”, *J. Engrg. Mech., ASCE*, Vol. 112, No.2 Pp. 154-174, (1986).

17. Harichandran, R. S., et al., “Response of long-span bridges to spatially varing ground motion,” *J. Struct. Eng, ASCE*, Vol. 122, No.5, Pp. 476-484, (1996).

18. Hao, H., Oliviera, C. S. and Penzien, J., “Multiple-station ground motion processing and simulation based on SMART-1 array data,” *Nuclear Engrg. And Des.*, Vol. 111, No.3, Pp. 293-310, (1989).

19. Hindy, A. and Novak, M., “Earthquake response of buried insulated pipes”, *J. Engrg. Mech. Div., ASCE*, Vol. 106, No.6 , pp. 1135-1149, (1980).

20. Abrahamson, N. A., “Spatial variation of multiple support inputs”, Proc., 1st U.S. Seminar on Seismic Evaluation and Retrofit of Steel Bridges, Dept. of Civ. Engrg., University of California at Berkeley, Calif., and California Department of Transportation, San Francisco, (1993).

21. Santa-Cruz, S., Heredia-Zavoni, E. and Harichandran, R. S., “Low-frequency behavior coherency for strong ground motion in Mexico City and Japan,” 12WCEE, No.0076, (2000).

22. Fenves, G. and Chopra, A. K., “Earthquake analysis of concrete gravity dams including reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 12, No.5, Pp. 663-680, (1984).
23. El-Aidi, B. and Hall, J. F., “Non-linear earthquake response of concrete gravity dams part 1: Modelling”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, No.6, Pp. 837-851, (1989).
24. Chopra, A. K., “Dynamic of structures, theory and application to earthquake engineering”, 3rd ED., Prentic Hall of India, (2008).

۲۵. نوائی‌نیا، بهرام، «تحلیل هیدرودینامیک سد و مخزن به روش لاگرانژی»، رساله کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۶۹).

۲۶. احمدی، محمدتقی، نوائی‌نیا، بهرام، «تحلیل دینامیکی سد و مخزن به روش لاگرانژی»، مجله بین‌المللی مهندسی دانشگاه علم و صنعت، جلد ٦، شماره ۱، (۱۳۷٤).

27. Hinton, E., Rock, T. and Zienkiewicz, O., “A note on mass lumping and related processes in the finite element method”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 4, No.3, Pp. 245-249, (1976).
28. Wilson, E. L. and Khalvati, M., “Finite elements for the dynamic analaysis of fluid-solid systems”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 19, No.11, Pp. 1657-1668, (1983).
29. Beer, G., “An isoparametric joint/interface element for finite element analysis”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 21, No.4, Pp. 585-600, (1985).

۳۰. عباسی، تهمینه، «تحلیل هیدرودینامیک سد و مخزن به روش لاگرانژی تحت تحریک غیریکنواخت»، رساله کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، (۱۳۹۵).